

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕКСТУРЫ В СПЛАВЕ Ti-6-4 В ПРОЦЕССЕ 3D-ПЕЧАТИ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО СПЕКАНИЯ

Насчетникова И. А., Степанов С. И.

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н.

Ельцина, Екатеринбург, Россия

naschetnikova@mail.ru, s.i.stepanov@urfu.ru

Аннотация. Методом ориентационной микроскопии исследованы текстурные состояния сплава Ti-6Al-4V, изготовленного методом селективного электронно-лучевого спекания (СЭЛС). Показано, что $\beta \rightarrow \alpha$ превращении имеет сдвиговой характер, а при охлаждении в сплаве Ti-6Al-4V выделяется вторичная β_{II} -фаза, ориентационно отличная от высокотемпературной β -фазы.

Ключевые слова: Аддитивное производство, титановые сплавы, ориентационные соотношения, текстура.

FEATURES OF TEXTURE FORMATION IN Ti-6-4 ALLOY MADE BY THE METHOD OF ELECTRON BEAM MELTING

Naschetnikova I.A., Stepanov S.I.

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The textural states of the Ti-6Al-4V alloy fabricated by a method of electron beam melting (EBM) were studied by orientation microscopy.

It was shown that the $\beta \rightarrow \alpha$ transformation has a shear character, and upon cooling, a secondary β_{II} phase is precipitated in the Ti-6Al-4V alloy, that is orientationally different from the high-temperature β -phase.

Key words: Additive Manufacturing, Titanium Alloys, Orientation Relationships, Texture

Введение. На сегодняшний день титан и титановые сплавы с различными характеристиками являются ключевыми и, во многих случаях, безальтернативными материалами для стратегических отраслей, к которым относятся авиастроение и ракетостроение, атомная энергетика, судостроение, медицинская, пищевая и химическая промышленность, электроника и т. п. [1].

Кроме этого, сплавы на основе титана являются одними из наиболее используемыми металлическими материалами для аддитивных технологий. В настоящее время аддитивные технологии являются относительно новым, перспективным и набирающим популярность методом получения металлических

материалов. При этом послойная технология изготовления изделий уже подразумевает в себе образование текстуры, что ведет к наличию ориентационно зависимых структурных и механических свойств готового изделия [2, 3].

Также, в процессе формирования титановых изделий, в металле имеют место полиморфные $\beta \leftrightarrow \alpha$ превращения, подчиняющиеся ориентационному соотношению Бюргерса, которое, в свою очередь, имеет вариативность [4]. Существование воспроизводимого ориентационного соотношения между начальной и конечной фазами определяет конечную текстуру любых выделений. Сплав Ti-6Al-4V (BT6) является наиболее широко используемым в промышленности среди других конструктивных титановых сплавов. Поэтому понимание закономерностей формирования и эволюции текстуры данного сплава представляет наибольшую актуальность.

Данная работа посвящена изучению текстуры фазовых превращений в сплаве Ti-6Al-4V с использованием методов ориентационной микроскопии.

Материалы и методы. В качестве исходного материала использовался порошок из $(\alpha + \beta)$ -титанового сплава Ti-6Al-4V. Образцы для исследований были изготовлены методом селективного электронно-лучевого спекания. Производство образцов велось при температуре в рабочей камере 700...750 °C и вакууме $1,5 \times 10^{-8}$ МПа. Толщина слоя порошка составляла 50 мкм. После аддитивного производства образцы были подвергнуты горячему изостатическому прессованию (ГИП) в атмосфере Ar в течение 2 часов при температуре 920 °C и давлении 120 МПа.

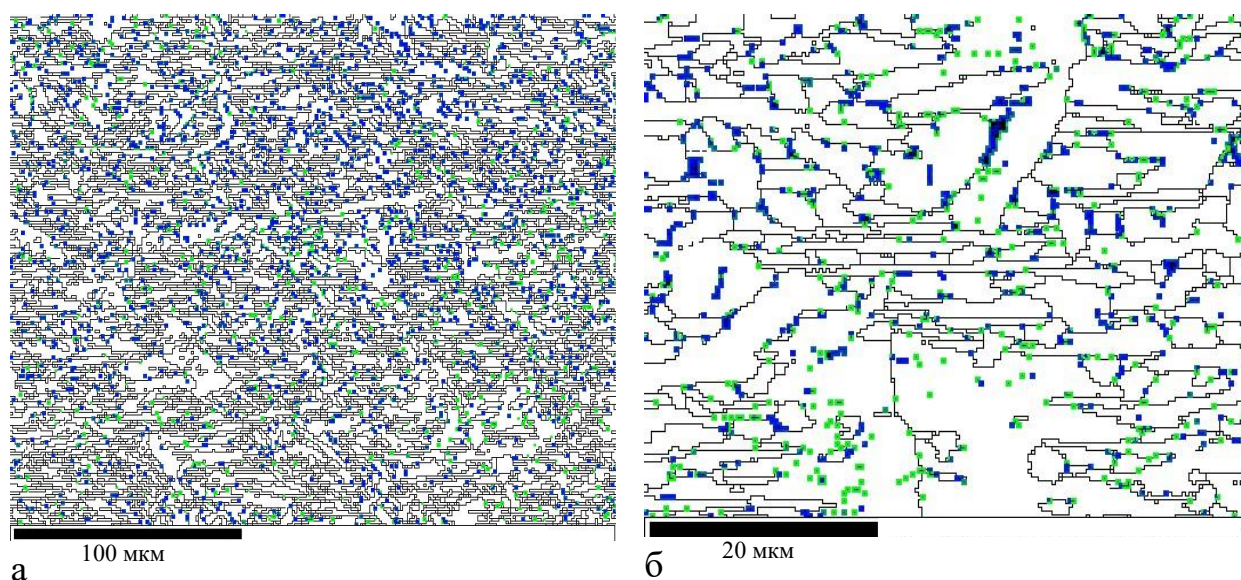
В данной работе текстура образцов была изучена методом ориентационной микроскопии с использованием сканирующего электронного микроскопа Zeiss Ultra Plus (СЭМ), оборудованного ДОЭ-приставкой Bruker. Данные ДОЭ анализа были обработаны с помощью программного обеспечения Oxford Instruments.

При проведении текстурного анализа аддитивных образцов в качестве лабораторной была принята система координат (X, Y, Z). На всех рисунках ось X параллельна горизонтальной оси образца, ось Y параллельна вертикальной оси образца, ось Z направлена нормально плоскости рисунка, то есть плоскости, с которой производилась съемка. Также ось совпадает Z с направлением электронного луча при формировании изделия. Относительно данной системы координат определялись ориентации компонент текстуры в индексах Миллера.

В работе была задействована часть программного обеспечения Oxford Instruments, позволяющая анализировать наличие и точность выполнения заданных ориентационных соотношений (ОС) между β - и α -фазами и строить распределения межфазных границ по углам их отклонения от идеальных. При анализе задавалось ориентационное соотношение Бюргерса: $\{1\bar{1}0\} <111> \beta \{001\} <110> \alpha$. На фазовых картах области β -фазы идентифицируются как цветом

(синий), так и межфазными границами, цвет которых характеризует степень отклонения их геометрических характеристик от ориентационного соотношения Бюргерса.

Результаты и обсуждения. Микроструктура образцов, полученных аддитивным методом, преимущественно характеризуется наличием α -фазы, представленной в виде зерен, как пластинчатой, так и округлой формы (рисунок 3.1). Фазовый ориентационный анализ показал во всех исследуемых областях наличие небольшого (порядка 5 %), но достаточного для достоверной идентификации, количества β -фазы. Основное количество β -фазы наблюдается на границах зерен или пакетов α -фазы. Кроме этого, небольшое количество β -фазы располагается в теле α -зерен либо единично, либо составляя последовательности из единичных β -выделений, никак не привязанных к межкристаллитным границам (рисунок 1).



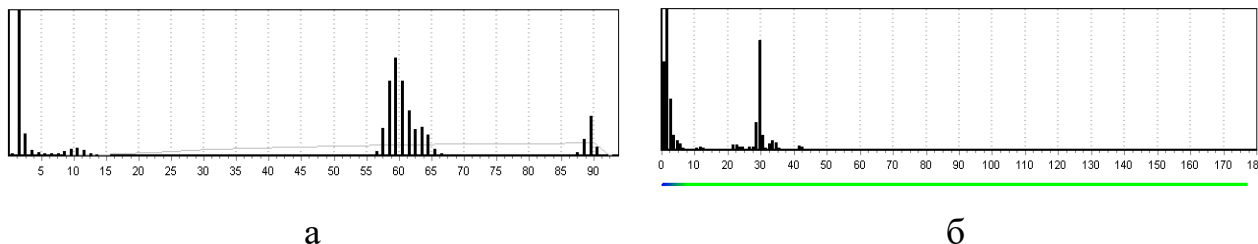
а – образец S3-1k; б – образец S3-5k

Рисунок 1 – Ориентационная карта с нанесением межкристаллитных границ в обеих фазах и выделением цветом β -фазы

Предварительный анализ спектров межкристаллитных границ показал, что в них помимо малоугловых границ, характеризующихся углами разориентаций до 4° , также наблюдается небольшое количество границ с углом разориентации $10 \pm 2^\circ$. По этой причине для анализа морфологии зеренной структуры строились ориентационные карты с построением межкристаллитных границ, характеризующихся углом разориентации более 8° . Толщина границ на ориентационных картах составляет 1 пиксель.

Различные ориентации α -фазы разделены в основном высокоугловыми границами, характеризующимися углами разориентации близкими к 60° . Также в спектре разориентации имеют место два заметных максимума, расположенных на углах близких к $90 \pm 2^\circ$ и к $10 \pm 3^\circ$ (рисунок 2, а).

Проведенный ориентационный анализ между β - и α -фазами (рисунок 2, б) показал, что большинство кристаллитов β -фазы находится с кристаллитами α -фазы в практически точных ориентационных соотношениях (ОС) Бюргерса: $\{1\bar{1}0\}\langle 111 \rangle_\beta \parallel \{001\}\langle 110 \rangle_\alpha$. Основная часть отклонений не превышает 3° .



а – распределения межкристаллитных границ по углам разориентации в α -фазе; б – распределение разориентировок межфазных границ по углам отклонений от ориентационного соотношения Бюргерса, под диаграммой – цветовой ключ к межфазным границам на рисунке 1

Рисунок 2 – Спектры разориентации межкристаллитных границ

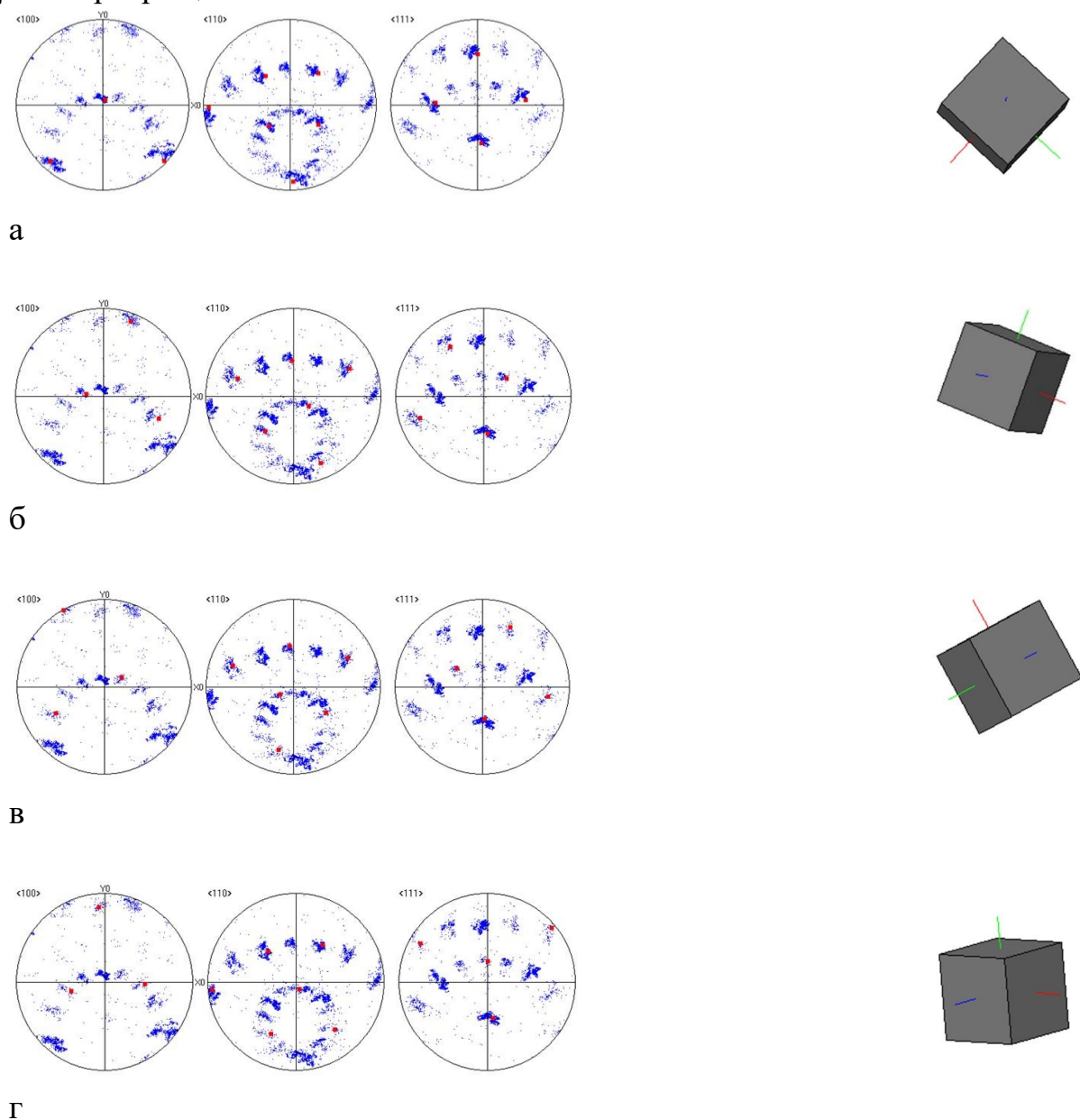
Кроме этого, в спектре разориентации систематически появляются и другие выраженные максимумы на углах близких к $21, 29, 35$ и 43° (рисунок 2, б), что также свидетельствует о выполнении ОС Бюргерса, но говорит о наличии трех дополнительных ориентировках β -фазы, что также подтверждается полученными прямыми полюсными фигурами (рисунок 3).

Согласно классическим представлениям, предполагается, что во время синтеза изделия в металле происходила следующая последовательность превращений: 1) нагрев сплава в β -область; 2) при охлаждении полиморфное $\beta \rightarrow \alpha$ -превращение с образованием мелкодисперсных пластин α -фазы и сохранением остаточной β -фазы; 3) при ГИП частичная рекристаллизация α -фазы, уход части границ от β -фазы, коагуляция β -фазы, стабилизация $(\alpha+\beta)$ -структуры за счет диффузионного перераспределения легирующих элементов.

Однако, было показано, что у полученных изделий текстура β -фазы представлена четырьмя дискретными ориентировками (одна, наиболее сильная, основная $\langle 001 \rangle$ и три дополнительные). Учитывая, что исследуемые области микроструктуры при формировании изделия в области высоких температур

(более T_{III}) являлись единым β -зерном, имеющим одну (исходную) ориентировку, можно предположить, что в процессе циклических охлаждений и нагревов, произошло выделение вторичной β -фазы, ориентационно отличающийся от исходной.

Одинаковая морфология областей выделения β -фазы, их расположение в структуре, симметрия ориентаций (по анализу ППФ на рисунке 3) дают основания считать, что данные области имеют единый механизм образования. Дискретность их ориентаций, дискретность спектра границ и наличие выполнения ориентационного соотношения предполагает сдвиговой характер $\beta \rightarrow \alpha$ -превращения.



а – исходная, основная ориентировка; б, в, г – дополнительные ориентировки

Рисунок 3 – ППФ $\{100\}$, $\{110\}$, $\{111\}$ β -фазы. Основные ориентировки приведены в виде элементарных кристаллографических ячеек, показано их соответствие рефлексам на ППФ

Заключение. В ходе исследования изучена текстура фазовых превращений сплава Ti-6Al-4V методом ориентационной микроскопии. Показано, что в процессе электронно-лучевого спекания $\beta \rightarrow \alpha$ превращение имеет сдвиговой характер. При термоциклировании в твердом состоянии в данном сплаве выделяется вторичная β_{II} -фаза, ориентационно отличная от высокотемпературной β -фазы.

Библиографический список.

1. Lutjering G. Titanium / G. Lutjering, J. C. Williams. Berlin: Springer-Verlag, 2nd ed, 2007. 258 p.
2. Gey N. Modeling the transformation texture of Ti-6-4 sheets after rolling in the β -field / N. Gey, M. Humbert, M. Philippe, Y. Combres // Mater. Sci. Eng. 1997. 230. P. 68 – 74.
3. Yang L. Deformed microstructure and texture of Ti6Al4V alloy / L. Yang, Y. Yang // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 2014. V. 24. P. 3103 – 3110.
4. Burgers W. G. On the process of transition of the cubic-body-centered modification into the hexagonal-close-packed modification of zirconium / W. G. Burgers // Physica. 1934. V. 1. P. 561 – 586.